

SENSOR DE NIVEL DE LÍQUIDO MULTIPUNTO BASADO EN PÉRDIDAS DE CURVATURA BASADAS EN FOP

M. Lomer

D. Blanco

Joseba Zubía

C. Jauregui

J.M. López-Higuera

Grupo de Ing. Fotónica
Universidad de Cantabria
email:lomer@teisa.unican.es

Grupo de Ing. Fotónica
Universidad de Cantabria

Grupo Comunicaciones Ópticas
Universidad del País Vasco

Grupo de Ing. Fotónica
Universidad de Cantabria

Grupo de Ing. Fotónica
Universidad de Cantabria

Resumen- Se presenta un nuevo sensor de nivel de líquido multipunto basado en las pérdidas por curvatura y pulido de una parte del núcleo de fibras ópticas plásticas. El pulido de la fibra en la zona curvada pone al descubierto el núcleo de la fibra, aumentando para elk haz de luz que se propaga, la sensibilidad con el medio exterior. Sobre un mismo trozo de fibra se han practicado 8 puntos de zonas curvadas de 180°, cada una de las cuales presenta una atenuación característica, que es detectada. Los resultados experimentales en presencia de agua y la unidad electrónica son igualmente presentados.

Abstract- In this paper we present a novel multipoint liquid level sensor based on radiation losses in bends of partially polished plastic optical fibers (POF). When a POF is partially polished at a bend, light propagation along the fiber core is more sensitive to outer media changes. 8 turns of 180° located along a POF piece yield a well defined attenuation that is detected by the sensor. Experimental results of the sensor for water as an outer media are given.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años han sido propuestos y desarrollados una gran variedad de montajes ópticos para la detección de parámetros físicos utilizando dispositivos a base de fibras ópticas [1]. La utilización de las fibras ópticas ha demostrado disponer de muchas ventajas en la construcción de sensores ópticos. Así, empleando sus propiedades convenientemente, se pueden realizar sensores intrínsecos o extrínsecos. Con la finalidad de aumentar la sensibilidad de la fibra óptica, para medir un parámetro específico, se pueden modificar las propiedades de guiado de las ondas. Una de estas posibilidades es la realización de curvaturas en las fibras. En efecto, las características de las pérdidas por curvaturas en fibras ópticas multimodo han sido estudiadas por varios autores [2-3]. Además, para la detección de las pérdidas debidas a las curvaturas, los tipos específicos de curvaturas han sido estudiados con la finalidad de obtener grandes rangos de detección [4-5]. Su empleo en el diseño y construcción de sensores basados en este efecto tiene numerosas aplicaciones prácticas. De otro lado, en la actualidad las fibras ópticas de plástico (FOP) han experimentado un gran crecimiento y se proponen como soluciones en comunicaciones de corta distancia (LAN, automóviles, aviones, ...), disponen de algunas ventajas

adicionales con respecto a las fibras de vidrio, tales como excelente flexibilidad, gran diámetro y apertura numérica, robustez, fácil de manipular y bajo costo. Estas ventajas hacen que sea un elemento atractivo a utilizar en los sistemas de sensores.

Los sensores ópticos basados en la modulación de intensidad son relativamente fáciles de poner en práctica y no requieren montajes complejos. Una posibilidad de modular la intensidad propagada dentro de una fibra es generando curvaturas en un tramo de ésta. En efecto, la potencia óptica detectada en el extremo de una fibra es sensible a las pérdidas por curvatura. Estas pérdidas son también sensibles al medio exterior de la zona curvada. Si además de la curvatura, se elimina la cubierta y se realiza un pulido para eliminar parte del núcleo, las pérdidas de curvaturas aumentan y hacen más sensible el sistema.

En este documento presentamos la realización de un sensor capaz de medir el nivel de líquido en diferentes puntos de un recipiente basado en pérdidas tanto por curvatura como por el pulido lateral adicional de FOP. Las curvaturas, en forma de U, se incluyen de manera puntual a lo largo de una fibra de 1 mm de diámetro. El sensor ha sido diseñado para medir niveles de líquido en 8 puntos con una buena precisión.

II. PRINCIPIO

Cuando se genera una curvatura en un tramo de una fibra óptica multimodo, el ángulo que forma un rayo incidente con el eje de la fibra en la interfaz núcleo/revestimiento aumenta, por lo que los modos de orden elevado son refractados. Las pérdidas debidas a la curvatura se componen de dos términos, un término transitorio en el inicio de la curvatura y un término distribuido a lo largo de esta zona.

Las grandes pérdidas de curvatura tienden a ocurrir, en las fibras multimodo, para un radio de curvatura crítico, R_c , que puede estimarse por la relación [6]:

$$R_c = \frac{3n_1^2\lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} \quad (1)$$

De la ecuación (1) se puede observar que las pérdidas de curvaturas se reducen cuando la diferencia relativa de índices es grande o cuando la longitud de onda de operación es corta. Cuando el radio de curvatura R no es demasiado cercano de R_c , las pérdidas transitorias en la entrada de la zona curvada

de una fibra multimodo, debido al filtrado espacial, se expresan mediante la fórmula [6]:

$$\alpha(\text{dB}) = 10 \log \left[\frac{R}{R - R_c} \right] \quad (2)$$

Han sido propuestos varios métodos de cálculo para calcular las pérdidas por curvatura. Un método, basado en el trazado de rayos, ha sido desarrollado en la referencia [7]. Por ejemplo, las pérdidas totales de radiación causadas por una vuelta completa en una fibra FOP típica de salto de índice de 1 mm de diámetro se muestran en la Fig. 1 en función del radio de curvatura. Se puede observar que para $R=5$ mm, las pérdidas de radiación son alrededor de 4,5 dB.

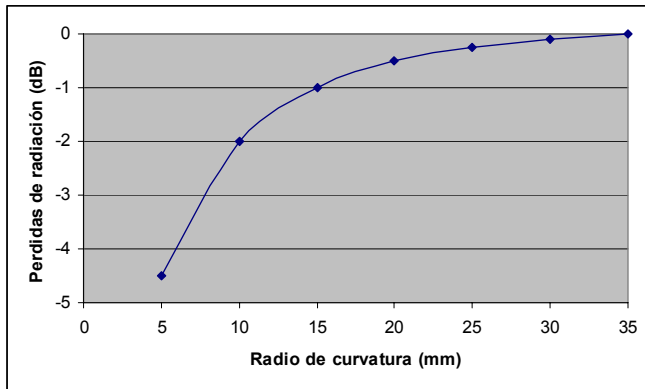


Fig. 1. Pérdidas de radiación total debidas a una curvatura completa de 360° de una FOP de PMMA de salto de índice ($n_1=1,492$ y $n_2=1,402$) y de 1 mm de diámetro en función del radio.

III. REALIZACIÓN EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Sobre un bloque de metacrilato se han grabado los surcos de 3 mm de profundidad, que sirven para alojar la fibra completa con el radio de curvatura deseado (Fig. 2a). En el presente trabajo se ha utilizado fibra FOP de PMMA de salto de índice de 1 mm de diámetro, con índice de núcleo y revestimiento $n_1=1,492$ y $n_2=1,402$, respectivamente. La FOP con la cubierta de protección mecánica tiene un diámetro de 2 mm. La fibra, con cubierta mecánica incluida, se fija permanentemente en el bloque con un pegamento compatible con el plástico. En nuestro montaje hemos realizado sobre la fibra una curvatura de 180°. Sobre la región curvada se ha procedido a pulir la cubierta mecánica, el revestimiento y una parte del núcleo con la finalidad de hacer mas sensible el sensor con el medio exterior, tal como se muestra en la Fig. 2b. Utilizando la maquina pulidora de fibras ópticas *Kent 3-Engis Ltd*, se han obtenido dispositivos tal como se muestra en la Fig. 3. El pulido deja una zona al descubierto, de forma elíptica, donde parte del núcleo se encuentra desprotegido y en contacto con el aire.

El espesor pulido (Fig. 2b), ε , a partir de la superficie curvada de la fibra, es determinado por la relación: $\varepsilon=d^2/(2R)$, donde d es el radio del eje largo de la elipse formada por el pulido de la región curvada. El parámetro d es medido experimentalmente. Por ejemplo, para $d=1,2$ mm y $R=5$ mm, se obtiene un espesor $\varepsilon=140\mu\text{m}$ en la zona central de la curvatura, valor similar a la medida experimental. Es,

este último valor que se ha elegido para todas las curvaturas empleadas en el sensor.

Cuando la luz se propaga a través de la fibra, se produce una atenuación en el extremo de la fibra, producto no sólo de la curvatura sino del pulido del revestimiento. Si el dispositivo es sumergido dentro del agua, las pérdidas disminuyen, debido a que se produce una variación del ángulo crítico (α_c) entre el núcleo y el medio exterior. Cuando el medio exterior es el aire ($n_L=1$), se tiene $\alpha_c=42^\circ$, mientras que si se tiene agua ($n_L=1,33$) se tiene $\alpha_c=63^\circ$. En este último caso, la luz propagada en la zona curvada se confina mejor debido a la variación de 21° del ángulo crítico.

El sensor de medida de nivel ha sido realizado utilizando una sola fibra, en la cual se han ubicado 8 dispositivos con curvatura en serie, separados entre ellos 34 cm. El sistema completo es mostrado en la Fig. 4. El primer dispositivo de medida es ubicado en el nivel más bajo, a partir de allí, la atenuación aportada por cada dispositivo hace que las pérdidas aumente en forma casi lineal.

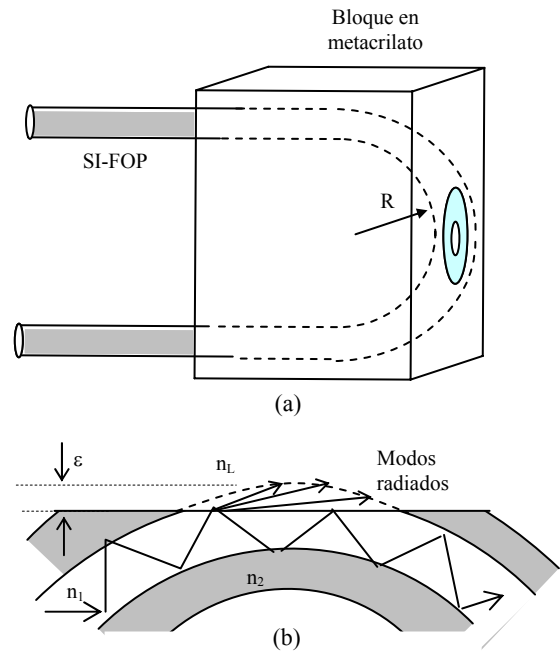


Fig. 2. Construcción del sensor basado en pérdidas por curvatura. a) FOP ubicada dentro de un bloque de metacrilato con radio de curvatura R , b) Región curvada con pulido adicional del núcleo.

Una unidad electrónica, de tratamiento de señal, se ha diseñado con la finalidad de poder visualizar cada uno de los puntos de medida. La señal óptica detectada en la extremidad de salida de la fibra es amplificada, disponiéndose de 0,5 voltios por cada punto de medida. Un circuito integrado multifunción permite tratar las variaciones de señal por cada punto de medida.

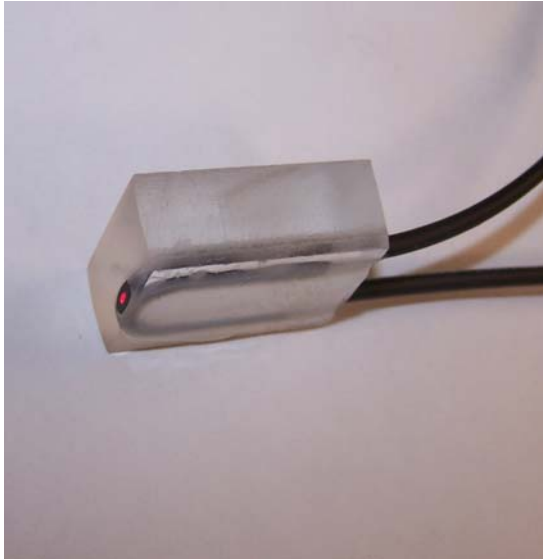


Fig. 3. Fotografía de una de las zonas curvadas.

Como el sistema de sensado debe actuar en un medio donde la luz ambiental puede afectar las medidas, se ha optado por un circuito modulador de la luz emitida por el diodo LED con una frecuencia de 1 KHz, mientras que en el receptor se ha agregado un filtro paso banda y un convertidor AC/DC. De esta forma se han eliminado las perturbaciones de luz parásita.

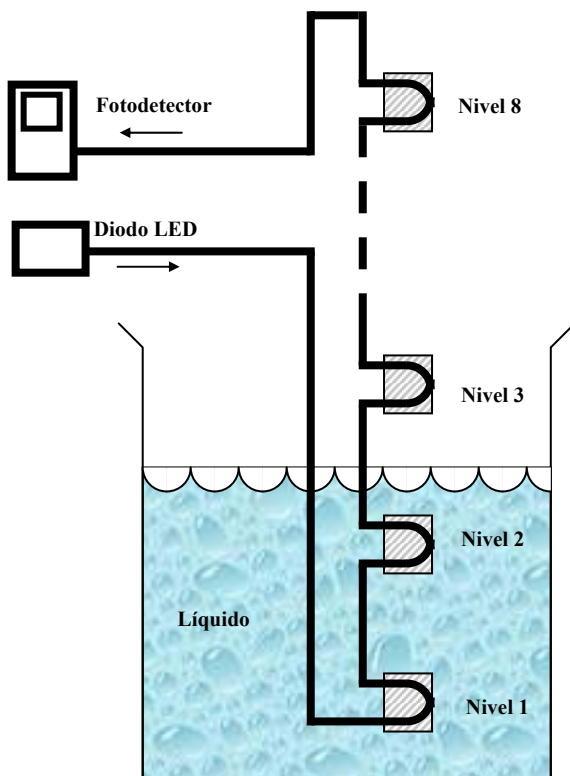


Figura 4. Esquema de funcionamiento del sensor.

En la figura 5 se muestran los resultados experimentales de las pérdidas por curvatura y pulido en función del espesor de pulido (distancia) para un dispositivo como el mostrado en la Fig. 3. El eje de abscisas tiene una escala de 1 mm, que es

dos veces la distancia del eje de la fibra hasta la cubierta mecánica. En un extremo de la fibra se ha inyectado luz precedente de un LED ($\lambda=660$ nm) y en el otro extremo se ha conectado al medidor de potencia óptica; la longitud total de la fibra empleada es de 2 m. Se puede observar que la pérdida debida únicamente a la curvatura es de 1,6 dB. De acuerdo a los cálculos teóricos, debería ser superior a 3 dB. Esta diferencia se puede explicar por el hecho que la fibra, en la zona curvada, se encuentra protegida y que los rayos radiados vuelven a entrar dentro del núcleo [8]. Además, el espesor del revestimiento es de $10 \mu\text{m}$. Los cálculos teóricos no tienen en cuenta el efecto del medio exterior en la zona curvada. A medida que el pulido elimina materia hasta llegar al revestimiento, las pérdidas se mantienen constantes. Una vez que se comienza a eliminar materia del núcleo las pérdidas se incrementan de manera lineal como se puede observar en la figura 6. Cada $100 \mu\text{m}$ de espesor pulido introduce aproximadamente 3 dB. Se ha pulido un espesor $\varepsilon \approx 400 \mu\text{m}$ del núcleo, donde las pérdidas con relación a $\varepsilon=0$ es de 12,8 dB. Nosotros hemos establecido un punto de trabajo en $\varepsilon=140 \mu\text{m}$, que representa una pérdida adicional de 3,4 dB con respecto a $\varepsilon=0$.

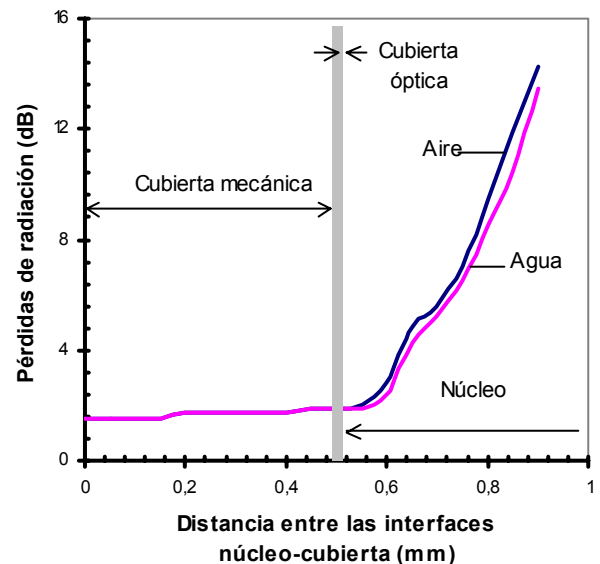


Fig 5. Atenuación experimental cuando el revestimiento y parte del núcleo se eliminan por pulido para un radio $R=5$ mm.

En la Fig. 5, también se muestra la diferencia que existe cuando la zona curvada se encuentra en el aire y cuando se encuentra sumergida en agua. Esta diferencia es de tan sólo 0,5 dB, suficiente para ser resuelto por el fotodetector.

En la Fig. 6 se muestra el resultado de las pérdidas introducidas por cada punto del sistema de sensado cuando se encuentran sumergidos. El nivel cero es el de referencia (sin agua); a continuación se ha ido llenando de agua el recipiente hasta alcanzar el nivel 8. En total se observa una atenuación de 2,11 dB, es decir que cada nivel utiliza en promedio 0,26 dB.

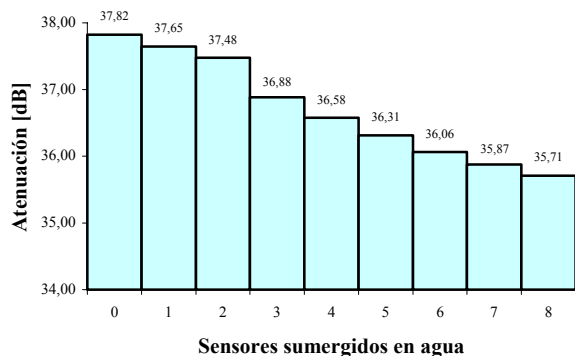


Fig. 6. Resultados experimentales de la medida en diferentes puntos.

IV. CONCLUSIONES

Se ha realizado un sensor de medida de niveles de líquido multipunto basado en pérdidas por curvatura en fibras ópticas de plástico. Las pérdidas adicionales, introducidas por el pulido de una parte del núcleo, hacen que el contacto del medio exterior sea más sensible. Los resultados experimentales tienen una buena relación con las previsiones teóricas cuando se incorpora el efecto del revestimiento finito de la fibra. La unidad optoelectrónica asociada al circuito de detección en extremidad de la fibra permite identificar el nivel ocupado por el agua en un recipiente. La utilización de fibras ópticas plásticas y fuentes de luz LED, hace que sea una solución de bajo coste y adaptada a diferentes tipos de líquidos, es decir óptimo para a aplicaciones industriales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos, a través de los proyectos MCYT. TEC2003-08361, TEC2004-05939-CO2-02, y 9/UPV 00147.345-14626/2002 ZUBIA..

REFERENCIAS

- [1] J. M. López-Higuera, “*Handbook of optical fiber sensing technology*”, John Wiley and Sons Ltd., England, 2002.
- [2] A.P. Boechat, D. Su, D.R. Hall, and J.D.C. Jones, “Bend loss in large core multimode optical fiber beam delivery systems”, *Applied Optics*, **30**, 321, 1991
- [3] J. Arrue and J. Zubia, Analysis of the decrease in attenuation achieved by properly bending plastic optical fibres”, *IEE Proc. Optoelectronics*, **143**, 135, 1996. J. Zubia, G. Cengotitabengoa and J. Arrue, “Passive Device Based on Plastic Optical Fiber to Determine the Index of Refraction of Liquids”, *Applied Optics*, **39**, N°6, 941-946, 2000.
- [4] D. Donlagic and B. Culshaw, “Propagation of the fundamental mode in curved graded index multimode fiber and its application in sensor systems,” *J. Lightwave Technology*, **18**, 334, 2000
- [5] K. Watanabe, K. Tajima, and Y. Kubota, “Macrobending characteristics of a hetero-core splice

fiber optic sensor for displacement and liquid detection,” *IEICE Trans. Electron.* **E83-C**, 314, 2000.

- [6] K.T.V. Grattan and B.T. Meggit, *Optical Fiber Sensor Technology*, Chapman & Hall, Great Britain, 1995.
- [7] J. Zubia and J. Arrúe “Plastic Optical Fibers: An introduction to their technological processes and applications”, *Optical Fiber Technology*, **7**, 101-140, 2001. J. Zubia, G. Aldabaldetrekú, G. Durana, J. Arrue, C.-A. Bunge, and H. Poisel, “Geometric Optics Analysis of Multi-Step Index Optical Fibres”, *Fiber and Integrated Optics*, **23**, 121-156, 2004.
- [8] G. Durana, J. Zubía, J. Arrúe y G. Aldabaldetrekú “Dependence of bending losses on cladding thickness in plastic optical fibers”, *Appl. Opt.*, Vol. 42, N°6, pp. 997-1002, (2003).